

А. А. Богатов, Д. Р. Салихьянов
Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург
salenhall@gmail.com

Abstract

At present, one of the highly demanded types of metal products is steel pipes for constructional purposes. The most important characteristics are their dimensional accuracy and surface finish, high level of mechanical properties and operating characteristics. Particular attention is paid to the precision of the internal channel of pipes, because this parameter determines the reliability and cost-effectiveness of their use. One of the most effective ways to increase the precision of the internal channel is pipe expansion by a mandrel. To investigate the accuracy of pipes a program of finite element simulation should be used. This has allowed us to investigate the extrafocal expansion at the inlet and outlet of the deformation zone, the inhomogeneity of deformation and the increasing pipe accuracy. The evaluation of these characteristics is an important factor for developing optimal conditions of deformation and tool design high-precision pipes in order to produce in terms of their inner diameter.

Введение

Стальные трубы являются одним из самых востребованных видов металлопроката. Они нашли широкое применение во многих отраслях промышленности. Наиболее важными ее характеристиками, определяющими их срок эксплуатации, надежность и экономическую эффективность, являются механические свойства, чистота поверхности и точность размеров. По способу производства бесшовные трубы подразделяются на горячедеформированные (катаные и прессованные) и холоднодеформированные (катаные и тянутые). Холоднодеформированные трубы отличаются высокой точностью размеров и чистотой внутренней поверхности. Точность размеров и чистота внутренней поверхности во многом определяют срок службы труб в таких отраслях как нефтедобывающая и нефтеперерабатывающая промышленность, атомная энергетика, химическое машиностроение и др. Однако, применение холоднодеформированных труб не всегда экономически целесообразно ввиду их высокой стоимости. Эффективным способом повысить точность внутреннего диаметра и качество внутренней поверхности горячекатаных труб является операция калибрования способом раздачи трубы на оправке.

При раздаче трубы на оправке происходит одновременное увеличение внутреннего диаметра, изменение толщины стенки и длины трубы, а также уменьшение шероховатости на внутренней поверхности. Закономерности их изменения, а также изменение силы раздачи в зависимости от способа и режимов процесса являются предметом исследования.

В большинстве работ [1 – 9] основной целью являлось изучение силовых нагрузок процесса

раздачи. Особенности формоизменения и точность труб после раздачи практически не рассматривались. В предлагаемой работе, используя компьютерное моделирование процесса раздачи, рассмотрены актуальные научные задачи исследования внеочаговой упруго-пластической деформации и изменения диаметра внутренней поверхности трубы в результате калибрования, а также оценки эффективности процесса калибрования способом раздачи.

1. Исследование внеочаговой деформации труб после раздачи

В последнее время, актуальным является исследование и разработка технических предложений повышения точности размеров труб при калибровании на оправке. В работе методом конечно-элементного моделирования (МКЭ-моделирования) с помощью программного комплекса Deform-3D исследовано формоизменение трубы при раздаче, определены границы зоны внеконтактной пластической деформации, дана оценка точности труб после раздачи.

На рис. 1, а представлен очаг деформации для одного из вариантов численного решения методом МКЭ. Граница начала пластической деформации определялась по интенсивности пластической деформации ϵ_{II} – пластическая деформация наступает при достижении величины 0,002. Участок, на котором начиналось сужение внутреннего канала трубы был принят как конец внеконтактного участка раздачи трубы. На рис. 1, б изображена схема очага деформации, в соответствии с которой исследовались величины, характеризующие внеконтактную пластическую деформацию.

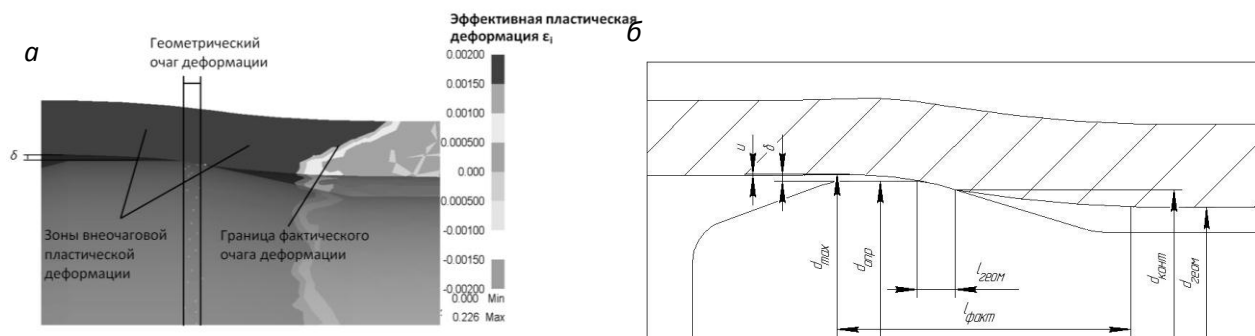


Рис. 1. – Очаг деформации при МКЭ-моделировании процесса раздачи (а) и схема очага деформации (б)

Очаг деформации трубы при раздаче состоит из нескольких характерных участков (рис. 1, а): линейного участка непосредственного контакта трубы и конусной оправки, являющегося геометрическим очагом деформации длиной $l_{\text{геом}}$ и двух криволинейных участков на входе и выходе, являющихся зонами внеочаговой пластической деформации. Общая длина очага пластической деформации равна $l_{\text{факт}}$. Величина увеличения внутреннего диаметра трубы δ является характеристикой внеочаговой пластической деформации на выходе из очага деформации, а величина уменьшения внутреннего диаметра трубы u характеризует упругое разгрузку трубы. Внеочаговая упругопластическая деформация характеризуется степенью внеочаговой раздачи трубы на входе в очаг деформации $\Delta\epsilon_0 = \frac{d_{\text{конт}} - d_{\text{геом}}}{d_{\text{геом}}}$ и на выходе $\Delta\epsilon_1 = \frac{d_{\text{max}} - d_{\text{опр}}}{d_{\text{опр}}}$.

При решении задачи раздачи трубы в качестве модели материала трубы использована упруго-пластическая упрочняемая среда, в качестве материала была выбрана сталь AISI-1045 из библиотеки материалов Deform-3D, являющаяся аналогом стали 45. Угол конусности рабочей части

оправки принят равным 12° , а диаметр калибрующей части оправки $d_{\text{опр}} = 64$ мм. Внутренний диаметр трубы в исходном состоянии в зависимости от ее точности может иметь любое значение из диапазона указанного в табл. 1. Относительная толстостенность труб $m = 1,15$ и $1,2$, где m равна отношению наружного диаметра к внутреннему. Трубы раздавались со степенью раздачи $\epsilon = 0,5 - 5\%$, где $\epsilon = \frac{d_{\text{опр}} - d_{\text{вно}}}{d_{\text{вно}}} \cdot 100\%$.

В качестве оценки соотношения длины геометрического и фактического очага деформации выбрано отношение $l_{\text{геом}}/l_{\text{факт}}$. На рис. 2 представлен график зависимости отношения $l_{\text{геом}}/l_{\text{факт}}$ от степени раздачи ϵ . Из графика видно, что при всех степенях деформации сохраняется низкое значение $l_{\text{геом}}/l_{\text{факт}}$ (от 0,07 до 0,14), из чего следует, что для обеспечения высокой точности труб в процессе раздачи крайне важно обеспечивать осевую симметрию трубы и оправки.

Точность калиброванных труб зависит от величины внеочаговой деформации на выходе $\Delta\epsilon_1$. На рис. 3 приведены графики зависимости степени внеочаговой деформации на входе $\Delta\epsilon_0$ и на выходе $\Delta\epsilon_1$ от степени раздачи ϵ .

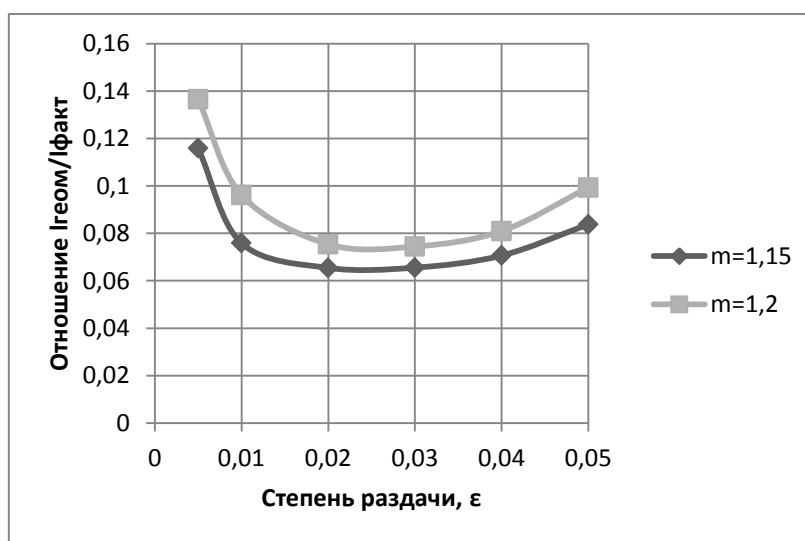


Рис. 2. - Зависимость отношения длины геометрического и фактического очага деформации $l_{\text{геом}}/l_{\text{факт}}$ от степени раздачи

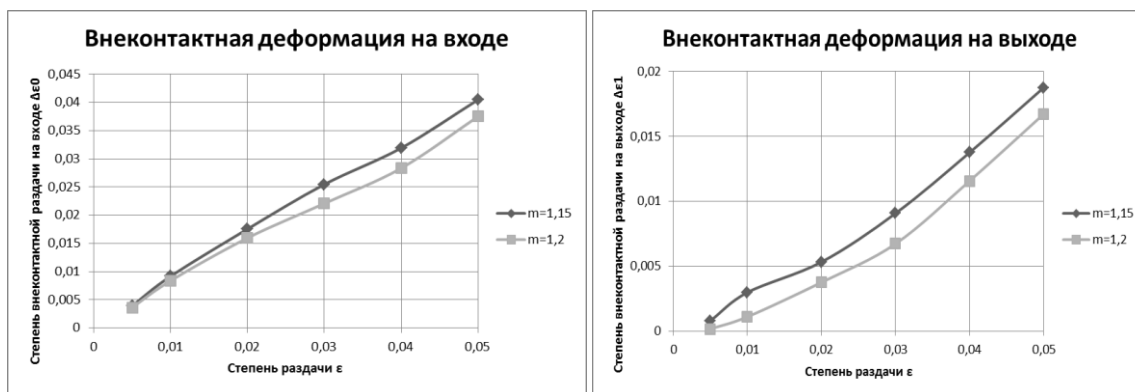


Рис. 3. - Зависимость степеней внеконтактной деформации на входе (а) и выходе (б) от степени раздачи

Из графиков видно монотонное возрастание обеих величин от степени раздачи, причем для более тонкостенных труб наблюдается большая степень внеконтактной деформации на входе и выходе.

2. Исследование точности труб при раздаче на оправке

Горячекатаные трубы обладают сравнительно низкой точностью. Например, в соответствии с ГОСТ Р 52203-2004 наружный диаметр насосно-компрессорной трубы 73х5,5 может быть в диапазоне от 72,2 мм до 73,8 мм, а толщина стенки – от 4,8 мм до 5,9 мм. Таким образом, внутренний диаметр трубы может быть в диапазоне от 60,4 мм до 64,2 мм. Этот диапазон значений можно уменьшить, применяя калибровку внутреннего канала труб. Кроме того, способом раздачи трубы уменьшается величины шероховатости: для горячекатаных труб $R_a = 40 - 50$ мкм; для холоднодеформированных – $R_a \leq 0,5 \dots 0,6$ мкм. Повышение точности внутреннего канала и уменьшение шероховатости поверхности способствуют уменьшению интенсивности коррозионных процессов и образованию асфальто-солевых отложений, а соответственно и повышению долговечности труб при добыче нефти.

В работе точность внутреннего канала труб оценивалась отношениями: до раздачи $p_0 =$

$\frac{d_{опр} - d_{вно}}{2 \cdot d_{ср}}$, где $d_{ср0} = d_{вно} + \frac{d_{опр} - d_{вно}}{2}$, и после раздачи – $p_1 = \frac{d_{вно max} - d_{вно min}}{2 \cdot d_{ср1}}$, где $d_{ср1} = d_{вно min} + \frac{d_{вно max} - d_{вно min}}{2}$. Значение диаметра оправки в вычислительном эксперименте было постоянным $d_{опр} = 64$ мм, а внутренний диаметр трубы имел значение в диапазоне от 60,8 мм до 63,68 мм. После калибрования трубы раздачей на оправке диапазон сужался, следовательно, повышалась точность внутреннего канала труб (табл. 1). Исследование было выполнено для показателей сил трения по Зиббелю ψ , равные 0,05, 0,15, 0,25. Эффективность калибрования оценивалась изменением отношения p_0/p_1 . Исходные данные и результаты изменения точности приведены в табл. 1 для $\psi = 0,15$. При раздаче трубы с малой степенью раздачи $\epsilon = 0,5\%$ внутренний диаметр трубы стал меньше диаметра оправки, а с ростом степени раздачи $\epsilon > 1\%$ $d_{вно} > d_{опр}$. На рис. 4 приведен график коэффициента повышения точности, из которого видно, что в области значений степени раздачи $\epsilon = 1 - 2\%$ эффективность калибрования внутреннего канала труб имеет наибольшее значение, а с ростом ϵ до 5 % эффективность снижается. С ростом показателя сил трения отношение p_0/p_1 становится меньше.

Таблица 1

Результаты вычислительного эксперимента

№ п/п	Исходный внутренний диаметр d_0 , мм	Относительная толщина стенки m	Показатель разброса значений внутренних диаметров труб p_0 , %	Степень раздачи ϵ , %	Конечный внутренний диаметр d_1 , мм	Показатель разброса значений внутренних диаметров труб после калибрования p_1 , %	Коэффициент повышения точности p_0/p_1
1	63,68	1,15	0,25	0,5	63,98	0,03	8,06
2	63,68	1,2		0,5	63,96		
3	63,36	1,15	0,5	1	64,05	0,055	9,09
4	63,36	1,2		1	63,98		
5	62,72	1,15	1,01	2	64,14	0,11	9,18
6	62,72	1,2		2	64,11		
7	62,08	1,15	1,52	3	64,27	0,21	7,24
8	62,08	1,2		3	64,23		
9	61,44	1,15	2,04	4	64,73	0,57	3,57
10	61,44	1,2		4	64,62		
11	60,8	1,15	2,56	5	65,07	0,83	3,08
12	60,8	1,2		5	64,9		

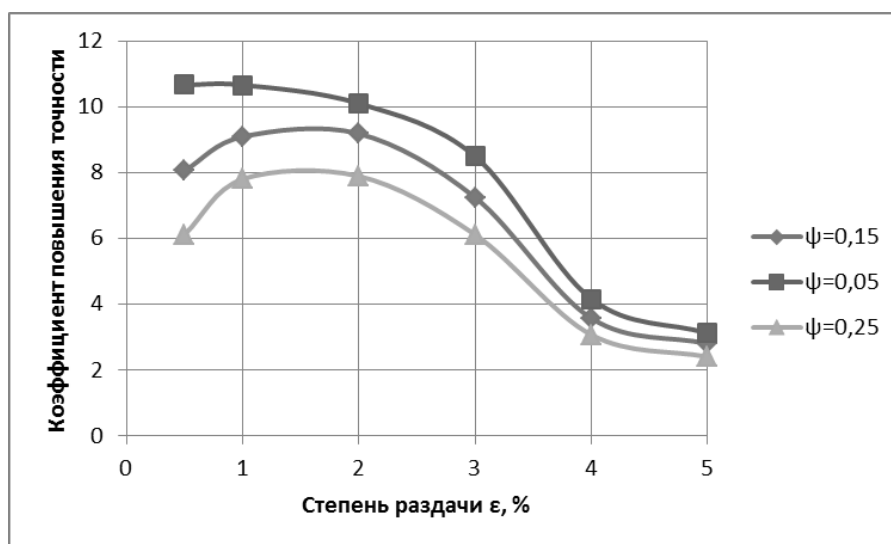


Рис. 4. - Коэффициент повышения точности

Значение показателя точности внутреннего диаметра труб после калибрования можно определить, если известны величины внеочаговой деформации на выходе δ и уменьшения внутреннего диаметра в результате разгрузки u , $p_1 = \frac{\delta - u}{d_{\text{опр}} + (\delta - u)}$. При степени раздачи $\epsilon = 0 - 2\%$ (см. рис. 4) значения величины внеочаговой деформации на выходе δ и упругой усадки u соизмеримы. При увеличении степени раздачи эффективность калибрования падает, т. к. величина внеочаговой раздачи δ превышает величину упругой усадки u . Разница между этими величинами увеличивается с ростом степени раздачи ϵ .

Заключение

В статье разработана методика изучения точности внутреннего канала труб при раздаче на оправке с использованием пакета МКЭ-моделирования и изучения формоизменения трубы при раздаче с учетом упруго-пластической деформации во внеочаговых зонах на входе и на выходе очага деформации. Показано, что наибольшая эффективность процесса калибрования внутреннего канала труб достигается при малой степени раздачи в диапазоне от 1 % до 2%.

Список литературы

1. Теория обработки металлов давлением. И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев, О. А. Ганаго и др. - М.: Металлургиздат, 1963. - 673 с.

- Исаев, А. Н. Механическая схема деформации трубчатой заготовки в процессе дорнования отверстия / А. Н. Исаев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. - 2001. - № 4. С. 6 – 11.
- The mechanics of sheet metal forming. Marciniak Z., Duncan J.L. 1992, Edward Arnold, London.
- Structural behavior of a solid tubular under large plastic radial expansion. Seibi A. C., Al-Hiddabi S., Pervez T // ASME Journal of Energy Resources and Technology, 124, 2005, p. 323 – 326.
- Simulation of solid tubular expansion in well drilling using finite element method. Pervez T., Seibi A., Karrech A. // Journal of Petroleum Science and Technology, 27, 2005, p. 775 – 794.
- Flaring – an analytical approach. Fischer F. D., Rammerstorfer F. G., Daxner T. // International Journal of Mechanical Sciences, 48, 2006, p. 1246 – 1255.
- Instability phenomena during the conical expansion of circular cylindrical shells. Daxner T., Rammerstorfer F. G., Fischer F. D. // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 194, 2005, p. 2591 – 2603.
- Study of flaring forming limit in the tube flaring process. Yeh F. H. // Journal of Strain Analysis, 42, 2007 p. 315-342.
- Analytical model for the expansion of tubes under tension. A. Karrech, A. Seibi // Journal of Materials Processing Technology 210, 2010, p. 356 – 362.